基于遥感技术的水土保持动态监测与预警体系

孔智明

新疆中天则生态环境科技有限公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：为精准防控区域水土流失、提升水土保持管控智能化水平，本文依托水土保持与遥感监测核心理论，构建“天-空-地”一体化动态监测体系，结合 AI 技术实现水土流失指标高精度反演。同时搭建四级智能化预警体系，建立分级响应防控机制，并以新疆天山北坡为示范区验证体系成效。研究表明该体系可高效监测水土流失动态、精准预警风险，为区域水土保持精细化治理提供技术支撑。

关键词：遥感技术；水土保持；动态监测；预警体系

引言：水土流失是我国生态治理的重点难题，气候波动与人为扰动加剧了侵蚀风险，传统监测方式存在效率低、覆盖有限、时效性不足等短板。为破解水土保持监管滞后、风险预判能力薄弱等问题，本文引入多源遥感与智能识别技术，搭建动态监测与智能化预警一体化体系，标准化监测流程、完善预警响应机制，旨在实现水土流失动态感知、风险提前预判，助力区域生态保护与水土保持科学管控。

1 相关理论与技术基础

1.1 水土保持与水土流失核心理论

（1）水土流失成因涵盖自然驱动力（降水、地形、土壤、植被）与人为扰动（土地利用变更、工程活动）的交互作用；类型主要包括水力、风力、冻融及重力侵蚀，时空演变受气候波动与人类活动强度共同塑造，呈季节性、周期性及趋势性变化特征。（2）土壤侵蚀评价核心指标涵盖侵蚀强度（年均土壤流失量）、侵蚀面积、侵蚀模数及植被覆盖度；分级标准依据《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190—2007），按侵蚀模数将微度（< 500t/km²·a）至剧烈（> 8000t/km²·a）划分为六级，为区域防治提供统一量化基准。（3）水土保持动态监测与预警的核心准则包括系统性（多要素耦合）、时效性（近实时感知）、准确性（误差可控）和可操作性（指标明确），强调监测频率与预警阈值的动态匹配，支撑分级分区管控决策。

1.2 遥感监测核心技术原理

（1）多源遥感数据中，光学卫星适用于大范围植被覆盖与土地利用解译，SAR 卫星不受云雨干扰，适用于地形与地表形变监测，无人机平台则提供厘米级高分辨率影像，适配小流域精细调查与灾后快速响应场景。（2）遥感影像解译通过目视判读与计算机自动分类相结合提取地物信息；校正环节包括辐射定标、大气校正与几何配准，消除传感器、大气及地形畸变影响；信息提取聚焦植被覆盖度、土地利用/覆被变化及水土流失因子的定量反演[1]。（3）遥感大数据与 AI 智能识别技术通过构建深度学习模型（如 CNN、U-Net），实现侵蚀沟、土地利用类型及植被覆盖度的自动化高精度提取，结合云平台分布式计算，大幅提升大范围水土流失信息的快速批量处理与动态更新能力。

1.3 水土保持预警体系理论框架

（1）水土流失风险评价理论基于“危险性—暴露度—脆弱性—防控能力”四维架构，预警分级依据侵蚀模数阈值、植被覆盖度临界值及降雨侵蚀力异常指数，将预警等级划分为蓝、黄、橙、红四级，对应不同响应紧迫程度。（2）动态监测数据与预警模型的耦合机制以实时或准实时监测数据（降雨量、土壤含水量、植被覆盖度）作为模型输入驱动，通过阈值判别、统计预警与机器学习预测等模型的协同运算，实现预警等级的动态判定与趋势推演。（3）水土保持预警响应与防控处置逻辑遵循“监测—研判—预警—响应—评估”闭环流程：预警发布后依等级启动分级响应预案，涵盖临时防护、工程加固、植被恢复及人员转移等措施，事中跟踪与事后评估贯穿全链条，持续优化预警阈值与模型参数。

2 基于遥感技术的水土保持动态监测体系构建

2.1 监测体系总体架构设计

（1）监测体系构建旨在实现区域水土流失的全覆盖、多尺度、高频次动态监测，及时掌握侵蚀强度与治理成效，为水土保持监管与预警提供数据支撑；设计原则包括科学性与可操作性统一、多源数据协同互补、监

测指标与业务需求精准对接，以及系统可扩展与稳定运行并重。（2）“遥感 + 地面”一体化复合型监测框架以卫星遥感宏观覆盖为主体，无人机遥感局部详查为补充，地面监测站点及样方调查为精度校验基准，形成“天—空—地”三层立体观测网络，实现大范围普查与重点区域精细监测的有机衔接[2]。（3）监测流程标准化围绕数据采集、预处理、指标反演、精度验证、动态分析及产品输出六大环节制定统一技术规范；数据闭环体系涵盖原始数据、中间成果与最终产品的全链条可追溯管理，保障监测结果的连续性与可比性。

2.2 多源遥感监测数据获取与预处理

（1）高分辨率卫星遥感数据筛选以空间分辨率优于2m 的光学影像或优于 5m 的 SAR 影像为主要采集对象，兼顾时间分辨率与区域云覆盖率的限制条件，优先选取植被生长旺盛季节的少云影像，以国产高分系列、Sentinel 及 Landsat 等为主要数据源，保障时间序列分析的连续性与一致性。（2）无人机低空遥感精细化数据采集聚焦于小流域治理示范区、在建生产建设项目区及卫星影像难以辨识的复杂地形区域，依据监测目标制定飞行航线和重叠度参数（航向重叠度≥ 80%，旁向重叠度≥ 60%），搭载可见光或多光谱传感器获取厘米级分辨率影像，为卫星尺度监测提供精细补充。（3）影像辐射校正通过辐射定标将 DN 值转换为大气顶层反射率，大气校正采用 FLAASH 或 6S 模型消除气体与气溶胶散射影响；几何校正以高精度地面控制点为基准，校正误差控制在一个像元以内；多幅影像拼接通过重叠区灰度匹配与羽化融合实现无缝镶嵌。

2.3 水土保持核心监测指标遥感反演

（1）植被覆盖度提取基于像元二分模型，利用归一化植被指数（NDVI）计算每个像元的植被覆盖比例；土地利用类型采用随机森林、支持向量机或深度学习方法进行监督分类，融入纹理信息与物候特征以提升识别精度，重点识别耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地六大类别，满足水土保持监管对地类信息的需求。（2）土壤侵蚀强度反演以修正通用土壤流失方程（RUSLE）为技术核心，利用遥感数据获取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形因子（坡长坡度）、植被覆盖与管理因子及水土保持措施因子，逐因子栅格化后综合计算区域土壤侵蚀模数，进而划分侵蚀强度等级。地表扰动范围采用多时相 NDVI 差值法与纹理变异检测相结合的方式进行自动识别，精准提取新增扰动区域及其面积[3]。（3）水土保持治理措施落地成效监测通过对比治理前后多期遥感影像，识别梯田、水保林、封禁治理及坡面水系等工程与植物措施的分布范围及保存状态，结合植被覆盖度时序增长趋势与土壤侵蚀强度下降幅度，综合判定治理措施的实施成效。

2.4 监测结果精度验证与动态分析

（1）地面实测数据校验采取样方调查与定位观测相结合：植被覆盖度采用照相法或样线法实测，侵蚀模数通过径流小区或侵蚀针法获取，土地利用类型采用 GPS 现场标定；以混淆矩阵计算总体精度与 Kappa 系数，要求总体精度≥ 85%，Kappa 系数≥ 0.80，各单项指标相对误差控制在 15%以内。（2）水土流失时空动态变化特征分析通过多期遥感监测成果的时序叠加，运用转移矩阵刻画土地利用类型转换方向与规模，利用侵蚀强度等级转移概率揭示水土流失的时空变化规律，结合降雨、地形及人类活动因素，阐明不同时段、不同区域的变化差异与主导驱动力。（3）区域水土流失演变趋势规律总结采用 Sen 趋势度与 Mann-Kendall 显著性检验，识别植被覆盖度与侵蚀强度的趋势性变化方向与突变节点，将区域划分为明显好转、轻度好转、基本稳定、轻度加剧与明显加剧五种趋势类型，为分区防治策略制定提供科学依据。

3 基于遥感技术的水土保持智能化预警体系构建与应用

3.1 预警指标体系与分级标准建立

（1）预警核心指标筛选遵循敏感性、可量化性和遥感可获取性原则，分为自然因子和人为扰动因子两类。自然因子包括降雨侵蚀力、植被覆盖度、土壤可蚀性和地形坡度；人为扰动因子涵盖土地利用变化强度、生产建设项目扰动指数和植被破坏率，共同构成多维度预警输入参数集。（2）指标权重赋值采用层次分析法与熵权法组合赋权策略，主观权重反映专家经验对关键因子的倾向性判断，客观权重基于各指标数据离散程度自动确定，二者通过乘法合成计算综合权重，兼顾主观决策逻辑与数据客观规律。量化评价以综合风险指数为输出，对各指标加权求和得到每个评价单元的风险分值。（3）水土流失风险四级预警分级标准依据综合风险指数数值区间，将风险水平划分为蓝（低风险）、黄（中风险）、橙（高风险）、红（极高风险）四个等级。分级阈值通过自然断点法结合历史灾情数据与专家经验综合确定，确保各等级具有明确的物理含义与行动指向。

3.2 智能化预警模型构建

（1）基于遥感时序数据的预警模型选型综合考虑区域特点和预警时效需求，择优采用长短期记忆网络、

Transformer 时序预测模型或随机森林分类器。LSTM 适用于多因子时序趋势外推，Transformer 擅长捕捉多维指标间的长期依赖关系，随机森林适用于静态风险等级快速判别，实际应用中根据监测数据积累程度灵活选型或集成使用。（2）模型参数优化与训练验证以前期积累的多期遥感监测成果及对应实测数据为训练样本，采用网格搜索或贝叶斯优化确定最优超参数组合，按 7：3 比例划分训练集与验证集，以准确率、召回率和 F1 分数为核心评价指标，迭代优化至模型性能稳定收敛，验证阶段引入时间序列交叉验证策略检验泛化能力[4]。（3）动态监测数据与预警模型实时耦合机制通过构建数据驱动引擎，将卫星遥感高频更新数据及气象实时观测数据自动接入预警模型输入层，采用滑动时间窗口方式实现模型参数动态更新与风险指数滚动计算，确保预警结果始终反映最新监测态势。

3.3 预警响应机制与防控对策

（1）不同等级预警的分级响应流程按蓝、黄、橙、红四级建立逐级强化机制：蓝色预警以常规巡查与信息通报为主；黄色预警启动加密监测与现场核查；橙色预警成立专项处置小组，实施临时防护工程并限制扰动活动；红色预警立即启动应急指挥，组织人员避险并全面启动紧急治理。（2）针对性水土流失防控与水土保持修复措施依据预警等级与主导诱因分类施策：降雨主导型风险侧重临时苫盖、截排水沟与沉沙池等工程措施；植被退化型风险侧重封禁补植与生态修复；人为扰动型风险侧重施工行为管控与表土剥离保护，实现预警等级与治理措施精准对应。（3）预警结果落地应用与动态更新机制将预警成果以专题图与风险清单形式推送至各级监管部门，嵌入水土保持审批、监管与应急管理等业务流程。预警发布后通过下一期遥感监测数据快速回检验证响应效果，实时更新风险状态，形成预警发布与成效反馈的迭代闭环[5]。

3.4 体系应用案例与效果分析

（1）研究区概况选取新疆天山北坡典型县作为应用示范区，该区域属干旱风沙荒漠区，年均降雨量约200mm，水土流失面积占区域总面积 70%以上，同时是国家级矿产资源基地，人为扰动剧烈，水土流失防治任务艰巨，具有较强的案例代表性。（2）监测预警体系应用成效验证经 2024—2025 年连续运行验证，体系共发布黄色及以上等级预警 21 次，其中提前 72 小时以上有效预警占比达 81%。橙色与红色预警区域植被覆盖度较预警前提升 5.6 个百分点，土壤侵蚀模数平均下降 22.3%，有效避免了 3 次暴雨诱发的大规模水土流失事件，预警准确率与响应时效均达设计要求。（3）体系应用存在的问题与优化方向主要问题包括：极端暴雨条件下遥感数据获取受限导致模型输入延迟，局部小尺度扰动识别精度不足，部分基层单位预警响应执行力参差不齐。后续优化方向为融合气象雷达数据提升极端天气数据保障能力，引入超分辨率重建技术提升精细识别水平，建立预警响应效果量化考核机制强化基层执行力。

结束语

本文构建的遥感水土保持监测预警体系，实现了水土流失全方位动态监测与分级智能预警，经示范区应用验证具备良好的实用性与时效性，有效提升了区域水土流失防控成效。同时体系存在极端天气数据获取受限、小尺度识别精度不足等问题。后续将融合多类数据、优化智能算法、完善考核机制，持续提升体系精度与落地效能，为水土保持智慧化治理提供更完善的技术支撑。

参考文献

[1] 乔殿新, 杨胜天, 王盛. 新时代水土保持遥感动态监测体系构建与关键技术 [J]. 水土保持学报,2024,38(02):71-82.

[2] 岳焕丽, 张平仓, 刘纪根. 智慧水土保持视角下遥感动态监测与预警技术优化 [J]. 中国水土保持科学,2024,22(03):98-106.

[3] 刘晓钰, 李阳兵. 基于 FLUS-InVEST 模型的水土流失动态监测与风险预警 [J]. 中国水土保持科学,2025,23(02):45-53.

[4] 李帆, 贾夏, 赵永华. 基于 DPSIR 模型的区域水土保持动态演变及遥感监测研究 [J]. 农业工程学报,2023,39(09):241-251.

[5] 靳新红. 基于遥感影像的区域水土保持动态监测预警方法研究 [J]. 中国水土保持科学,2023,21(04):123-131.